

Equações de biomassa de pinheiro-bravo jovem para o nordeste de Portugal

Paula Soares¹, Ana Filipa Mendes², Paula Seixas Oliveira³, Domingos Lopes²

Sumário. O pinheiro-bravo é a espécie florestal resinosa autóctone que ocupa maior área em Portugal continental. A recente apresentação da metodologia de florestação, desenvolvida no âmbito do mercado voluntário de carbono português, reforça a necessidade de existirem equações que permitam estimar quer o *stock* quer o sequestro/emissão de carbono associado a novas plantações. A primeira quantificação do carbono deve ser feita em idades jovens. Este estudo tem por base um conjunto de dados proveniente do abate de 30 árvores em povoamentos jovens de pinheiro-bravo localizados na região nordeste de Portugal. Define-se um conjunto de equações para estimar, ao nível da árvore, a biomassa por componentes (tronco, ramos e folhas). A biomassa total acima do solo é dada pela soma das biomassas das componentes da árvore. A altura máxima deste conjunto de árvores são 3,5 m pelo que se aconselha a utilização destas equações para povoamentos com características idênticas.

Palavras-chave: *Pinus pinaster* Ait.; plantações; mercado carbono.

Biomass equations for young maritime pine in northeastern Portugal

¹ Centro de Estudos Florestais, Laboratório Associado TERRA, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. *E-mail: paulasoaes@isa.ulisboa.pt

² Depart Ciências Florestais e Arquitetura Paisagista, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.

³ Depart de Agronomia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.

Abstract. Maritime pine is the native coniferous forest species that occupies the largest area in mainland Portugal. The recent presentation of the afforestation methodology, developed within the scope of the Portuguese voluntary carbon market, reinforces the need for equations that allow for the estimation of both carbon stock and carbon sequestration/emissions associated with new plantations. The first carbon quantification should be carried out at young ages. This study is based on a dataset obtained from the felling of 30 trees in young maritime pine stands located in the northeastern region of Portugal. A set of equations is defined to estimate, at the tree level, the biomass by components (stem, branches, and foliage). The total aboveground biomass is given by the sum of the biomass of the tree components. The maximum height of this set of trees is 3.5 meters, so the use of these equations is recommended for stands with similar characteristics.

Keywords: *Pinus pinaster* Ait.; plantations; carbon market.

Introdução

A determinação da biomassa associada às árvores e, em termos genéricos, às áreas florestais, tem sido objeto de investigação. Entre as abordagens metodológicas, aceita-se, como padrão base, o uso de relações alométricas. De facto, estas relações começaram por ter aplicação generalizada no estudo e caracterização de animais e de plantas herbáceas (WEST *et al.*, 2001), facto que levou os investigadores florestais a pesquisar, com metodologia semelhante, regras universais, que permitissem estimar a biomassa das árvores em função de variáveis mensuráveis, facilmente observáveis (ENQUIST e NIKLAS, 2002).

Este tipo de investigação tem sido objeto de interesse crescente, face à necessidade de obter informação que sustente a formulação de políticas ambientais, de cariz climático, que exigem, entre outras, estimativas fiáveis de *stock* e sequestro/emissão de carbono em ecossistemas florestais (BROWN, 2002; JOOSTEN *et al.*, 2004). As florestas desempenham um papel fulcral no ciclo de carbono ao capturarem-no da atmosfera, através do processo fotossintético. O crescimento das florestas traduz-se no armazenamento de carbono na biomassa das suas árvores. Devido à grande quantidade de biomassa acumulada nas florestas, estas constituem uma das grandes reservas de carbono do planeta e, em simultâneo, um sistema de enorme relevância na ação da sua captação (MONTERO *et al.*, 2005).

A definição de metodologias de florestação visando o mercado voluntário de carbono português (CANAVEIRA *et al.*, 2025) assenta, entre outros aspetos, na existência de equações para estimar a biomassa das árvores florestais. A definição da *baseline* das plantações, temporalmente o mais próximo possível da plantação, requer equações ajustadas com um conjunto de dados que contenha informação sobre árvores jovens. A existência de equações de biomassa para as componentes da árvore assume, neste caso, uma maior relevância porque, no contexto do mercado de carbono, as diferentes componentes da árvore têm períodos de sequestro de carbono diferentes.

Em Portugal existem publicadas várias equações para estimar a biomassa de árvores de pinheiro-bravo, embora a maior parte tenha sido ajustada com um conjunto de árvores que não incluía árvores jovens. No âmbito do Projeto rePlant (2020/23) foi produzido um trabalho onde foram listadas as equações para estimar a biomassa de pinheiro-bravo em Portugal (SOARES *et al.*, 2021): PÁSCOA *et al.* (2004), árvores abatidas na Mata Nacional de Leira, com idade mínima das árvores 14 anos; FAIAS (2009), árvores abatidas em povoamentos em Alcácer do Sal, Covilhã, Leiria, Lousã, Viseu e Vale do Tâmega, com idade

mínima das árvores 14 anos; ARNALDO *et al.* (2010), árvores abatidas em povoamentos localizados no Parque Natural de Montesinho, com idade das árvores igual a 13 anos. Neste último trabalho, são apresentadas equações de biomassa da árvore para as componentes folhas e tronco e para a biomassa total acima do solo, mas não é garantida a aditividade das componentes de biomassa (ex., CARVALHO, 2003). No trabalho de VIANA *et al.* (2013) são apresentadas equações de biomassa total e por componentes para o pinheiro-bravo, ajustadas com dados de 77 árvores abatidas em povoamentos nas regiões norte e centro de Portugal. Não há, no entanto, indicação da idade ou dimensão mínima das árvores usadas.

O objetivo deste estudo é desenvolver equações de biomassa acima do solo e por componente (tronco, ramos e folhas) para árvores jovens de pinheiro-bravo para a região nordeste de Portugal, usando a estimação simultânea de um sistema de equações para obter a aditividade das componentes de biomassa das árvores.

Materiais e Métodos

Dados das árvores abatidas

O ajustamento das equações de biomassa acima do solo para os pinheiros-bravos jovens teve por base o conjunto de árvores abatidas do estudo de ARNALDO *et al.* (2010). Os dados tiveram origem em plantações puras de pinheiro-bravo com 13 anos, com uma densidade de 650 árvores por hectare, e localizadas no Parque Natural de Montesinho, no nordeste de Portugal, na região de Trás-os-Montes. Esta zona caracteriza-se por verões quentes e secos e invernos frios, apresentando valores de temperatura média anual de 11,8°C. A precipitação média anual é de 758 mm (período de referência 1991–2020, IPMA).

Na Tabela 1 apresenta-se a caracterização das 30 árvores de pinheiro-bravo jovem. São apresentados somente valores para as variáveis da árvore, pois a informação existente não permitiu o cálculo de variáveis do povoamento. Este conjunto de dados foi, inicialmente, utilizado para quantificar os efeitos da desfolha provocada pela processionária do pinheiro no crescimento em biomassa (ARNALDO *et al.*, 2010).

Tabela 1. Caracterização das 30 árvores de pinheiro-bravo jovem abatidas para determinação da biomassa total e por componentes

	d0,10 (cm)	d (cm)	h (m)	v (m ³)
Máximo	7,3	3,6	3,1	0,0032
Médio	4,2	1,5	2,0	0,0011
Mínimo	2,7	0,0	1,2	0,0003
Desvio padrão	1,2	0,9	0,5	0,0008

Notas: d0,10, diâmetro da árvore medido a 10 cm do solo; d, diâmetro da árvore medido a 1,30 m de altura; h, altura total da árvore; v, volume total da árvore

Em cada árvore abatida mediram-se as alturas total, da base da copa e do cepo. Mediu-se o diâmetro cruzado do cepo e o diâmetro a 1,30 m. Foram também medidos os diâmetros a várias alturas, definidas por intervalos de 10%, iniciando-se e terminando, respetivamente, a 10% e 90% da altura total. O tronco foi pesado. Os ramos foram separados do tronco e foram pesados. As folhas de cada ramo foram removidas e pesadas. Foram recolhidas amostras das várias componentes que foram levadas para laboratório. As amostras foram secas na estufa a 75° C, até peso constante, tendo-se registado os pesos secos. Com base na relação peso seco/peso verde das amostras foi calculada a biomassa seca das componentes de cada árvore: tronco (casca e lenho), folhas, ramos e pinhas.

O volume total foi determinado com base nos valores de diâmetro e no comprimento dos toros.

Metodologia de ajustamento das equações de biomassa

Para o ajustamento das equações utilizou-se a metodologia que a seguir se descreve.

A biomassa das componentes da árvore – tronco, ramos e folhas –foi estimada com base na relação alométrica, tendo sido testadas como variáveis independentes o diâmetro e a altura total ou combinações destas (Figura 1).

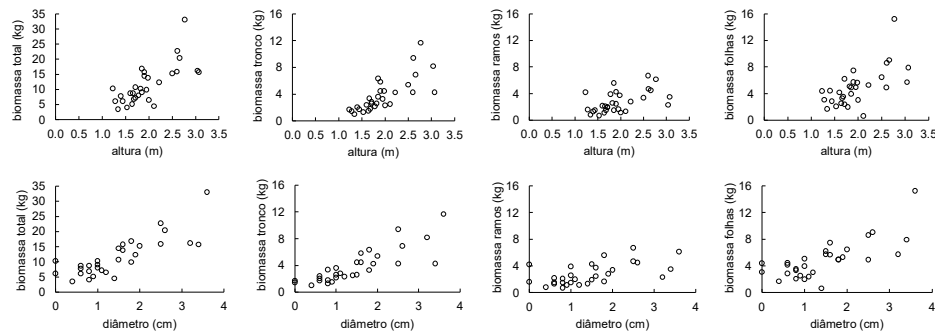


Figura 1 - Relação entre a biomassa total e a biomassa por componentes (tronco, ramos e folhas) com a altura total e o diâmetro das árvores abatidas

Pelo facto das árvores jovens poderem não ter diâmetro a 1,30 m, o modelo alométrico testado foi do tipo:

$$w = a_0 (d + 1)^{a_1} h^{a_2}$$

Para cada componente, o ajustamento das equações foi feito recorrendo ao procedimento NLIN do módulo SAS STAT v9.4 (SAS Institute), utilizando o algoritmo de Gauss-Newton que, através de um processo iterativo, gera estimativas optimizadas para os vários parâmetros, minimizando em simultâneo a soma dos quadrados dos resíduos. Selecionou-se o modelo que, para cada componente, apresentou um maior R^2 ajustado e menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR), sendo condição que todas as estimativas dos parâmetros diferissem significativamente de zero.

As árvores abatidas não foram seleccionadas de um conjunto de árvores de uma parcela previamente medida, pelo que não estavam disponíveis parâmetros do povoamento tais como altura dominante, número de árvores e área basal, as quais não puderam ser testadas na expressão dos coeficientes das equações.

De seguida analisou-se a homocedasticidade dos resíduos, por observação dos gráficos dos resíduos studentizados em função dos respectivos valores estimados. No caso de não se verificar homocedasticidade definiu-se uma equação para ponderação dos resíduos efetuando-se, posteriormente, o reajustamento das equações de biomassa por regressão não linear ponderada com pesos determinados de acordo com a metodologia apresentada por Parresol (1999).

Foi também analisada a normalidade dos resíduos studentizados, através do gráfico de probabilidades normal. A não normalidade dos resíduos foi

ultrapassada efetuando o reajustamento das equações por regressão robusta baseada no método do estimador de Huber (Myers, 1986).

Tendo-se selecionado e ajustado a equação para cada componente de biomassa, procedeu-se ao ajustamento simultâneo das equações com base no procedimento referido por Parresol (2001) - método de equações aparentemente não relacionadas designado por *Nonlinear Seemingly Unrelated Regressions* (NSUR) -, o qual foi aplicado recorrendo à opção ITSUR do procedimento MODEL do SAS (SAS Institute). Neste procedimento, a biomassa das componentes foi calculada pelas equações selecionadas e a biomassa total como o somatório das biomassas das componentes. Cada regressão foi ajustada utilizando os pesos específicos determinados no ajustamento independente.

Foram usadas as seguintes estatísticas na avaliação das equações selecionadas (Myers, 1986):

- coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajust})

$$R^2_{ajust} = 1 - \frac{\frac{SQE}{n-p}}{\frac{SQT}{n-1}} = 1 - \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}}{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R^2)$$

Onde y , variável dependente observada; $\hat{y}$, estimativa da variável dependente; SQE, soma dos quadrados dos resíduos; SQT, soma dos quadrados total; n , número total de observações; p , número de parâmetros do modelo; R^2 , coeficiente de determinação.

- estatísticas dos resíduos PRESS e dos resíduos PRESS absolutos, os quais avaliam, respectivamente, o enviesamento e a precisão do modelo

$$PRESS = e_{i,-i} = (y_i - \hat{y}_{i,-i}) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

Onde n , número total de observações; $e_{i,-i}$, a diferença entre o valor observado e o valor estimado pela regressão, ajustada com o conjunto total de observações, excluindo a observação i ; o número total de resíduos PRESS calculados é igual ao número total de observações.

Resultados

Os valores de biomassa (seca) total da árvore variam entre 3,5 e 33,0 kg, com valor médio de 11,7 kg e desvio padrão de 6,5 kg. A copa é, em relação ao tronco,

a componente dominante na biomassa total (Figura 2). As folhas são, ao nível da copa, a componente dominante.

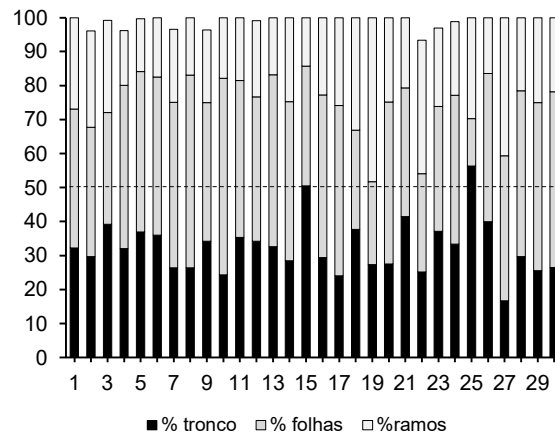


Figura 2 – Proporção de tronco (casca+lenho), folhas e ramos (copa) nas 30 árvores abatidas

Para a amplitude de valores de diâmetro das árvores abatidas, a biomassa da copa é sempre superior à biomassa do tronco, embora a proporção diminua ligeiramente com o aumento do diâmetro (Figura 3).

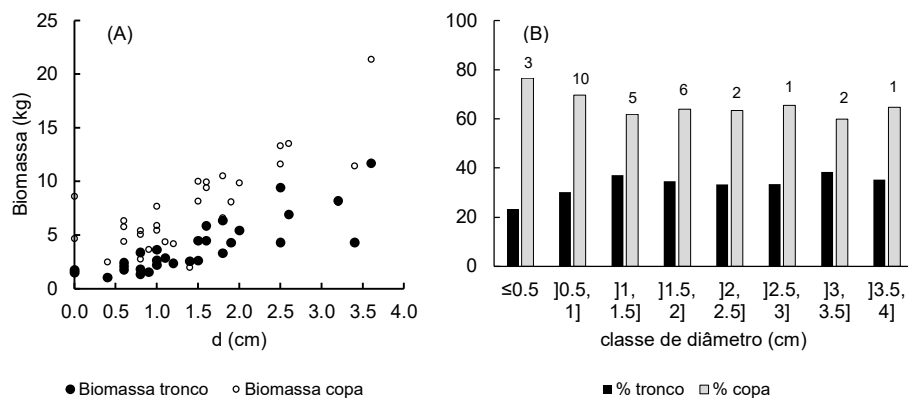


Figura 3 – Relação entre a biomassa do tronco e da copa e o diâmetro da árvore (A) e proporção da biomassa do tronco e da copa por classe de diâmetro (B); em (B) está indicado, por cima da barra, o número de árvores por classe de diâmetro

As formulações selecionadas para as equações de biomassa das componentes e total acima do solo são as seguintes:

- tronco: $ws = a_0 (d + 1)^{a_1}$
- folhas: $wl = a_0 (d + 1)^{a_1} h^{a_2}$
- ramos: $wbr = a_0 (d + 1)^{a_1}$
- total: $wt = a_0 (d + 1)^{a_1} h^{a_2}$

A Tabela 2 sumariza os valores das estatísticas PRESS obtidas neste estudo. A equação da biomassa do tronco é a mais precisa; a equação da biomassa dos ramos é a menos enviesada. A equação da biomassa das folhas é, simultaneamente, a mais enviesada e menos precisa.

Tabela 2. Valores dos resíduos PRESS obtidos para as equações de biomassa por componentes

	mPRESS	m PRESS	P5(PRESS)	P95(PRESS)	SQE	R ² ajust
ws	0,0659	1,1078	-1,9456	3,1625	74,1186	0,69
wl	0,1953	1,6740	-3,2424	3,3378	134,3130	0,64
wbr	-0,0014	1,1227	-1,6082	3,0854	58,8331	0,34
wt	0,2797	3,2848	-5,8510	7,6977	521,4940	0,70

Notas: ws, biomassa do tronco; wl, biomassa das folhas; wbr, biomassa dos ramos; wt, biomassa total acima do solo; mPRESS, média dos resíduos PRESS; m | PRESS |, média dos resíduos PRESS absolutos; P5(PRESS) e P95(PRESS), percentis 5 e 95 dos resíduos PRESS, respectivamente; SQE, soma dos quadrados dos erros; R²ajust, coeficiente de determinação ajustado

As equações de biomassa da árvore, obtidas por ajustamento simultâneo, são as seguintes:

- tronco

$$ws = 0,82682 (d + 1)^{1,63709}$$

- folhas

$$wl = 1,38040 (d + 1)^{2,39942} h^{-1,41296}$$

- ramos

$$wbr = 0,87860 (d + 1)^{1,22265}$$

- total acima do solo

$$wt = ws + wl + wbr$$

$$wt = 0,82682(d + 1)^{1,63709} + 1,38040(d + 1)^{2,39942} h^{-1,41296} + 0,87860(d + 1)^{1,22265}$$

Conclusão

Com a recente apresentação da metodologia de florestação, desenvolvida no âmbito do mercado voluntário de carbono português, a existência de equações que nos permitam estimar quer o *stock* quer o sequestro/emissão de carbono associados às novas plantações são essenciais (CANAVEIRA *et al.*, 2025). A metodologia de florestação apresentada estabelece os requisitos e as orientações para quantificar os benefícios climáticos líquidos das atividades que sequestram carbono pela criação de novas florestas em Portugal. Ao se considerarem as áreas anteriormente não ocupadas por floresta, a quantificação do *stock* de carbono associado a plantações de espécies autóctones – como é o caso do pinheiro-bravo – passa, obrigatoriamente, pelo desenvolvimento e existência de ferramentas que permitam efetuar essa contabilização. As equações de biomassa que resultem em estimativas exatas (precisas e não enviesadas) para serem usadas em povoamentos jovens são essenciais.

Neste trabalho, desenvolvem-se equações de biomassa por componentes (tronco, folhas e ramos) para árvores de povoamentos jovens de pinheiro-bravo na região nordeste de Portugal. A biomassa total acima do solo da árvore é calculada pela soma da biomassa das componentes. A altura máxima deste conjunto de árvores são 3,5 m pelo que se aconselha a utilização destas equações para povoamentos com características idênticas. Este trabalho deve ser encarado como um estudo preliminar, prévio em relação a um estudo geograficamente mais alargado, ampliando drasticamente a base de dados, em povoamentos jovens de pinheiro-bravo. Além disso, está em falta a quantificação da biomassa de raízes. Desse trabalho poderá então resultar um conjunto de equações de biomassa com maior capacidade extrapolativa e possível de ser usado em Portugal continental.

Agradecimentos

O trabalho da 1ª autora insere-se dentro das atividades do Centro de Estudos Florestais (CEF) do Instituto Superior de Agronomia, financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do Projeto UID/00239: Centro de Estudos Florestais, e das atividades do Laboratório Associado TERRA, LA/P/0092/2020.

Referências Bibliográficas

- ARNALDO, P.S., CHACIM, S., LOPES, D., 2010. Effects of defoliation by the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* on biomass growth of young stands of *Pinus pinaster* in northern Portugal. *iForest* **3**: 159 -162.
- BROWN, S., 2002. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution* **116**: 363 – 372.
- CANAVEIRA, P., LOURENÇO, P., RODRIGUES, H., SEIXAS, A., SANTOS, R.F., MARTINHO, S., VAZ-FREIRE, L., SOUSA, R., PEREIRA, J.P., SEQUEIRA, N., COSTA, A.C., 2025. *Florestação em Portugal*. Comissão Técnica de Acompanhamento do Mercado Voluntário de Carbono, Agência para o Clima, Ministério do Ambiente e Energia, Lisboa.
- ENQUIST, B.J., NIKLAS, K.J., 2002. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning across seed plants. *Science* **295**: 1517 – 1520.
- FAIAS, S., 2009. *Analysis of Biomass Expansion Factors for the Most Important Tree Species in Portugal*. Tese de Mestrado em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais, Instituto Superior Agronomia, Lisboa.
- CARVALHO, J.P., 2003. Uso da propriedade da aditividade de componentes de biomassa individual de *Quercus pyrenaica* Willd. com recurso a um sistema de equações não-linear. *Silva Lusitana* **11(2)**: 141-152.
- MONTERO, G., RUIZ-PEINADO, R., MUÑOZ, M., 2005. *Producción de Biomasa y Fijación de CO2 por los Bosques Españoles*. Monografías INIA: Serie Forestal, nº 13, INIA-Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid.
- MYERS, R.H., 1986. *Classical and Modern Regression with Applications*. Duxbury Press. Boston, Massachusetts, EUA.
- PARRESOL, B.R., 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* **45**: 573–593.
- PARRESOL, B.R., 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research* **31 (5)**: 865-878.
- PÁSCOA, F.M.F., GONZÁLEZ, R.S., CARVALHO, J., 2004. Estabelecimento simultâneo de equações de biomassa para o pinheiro bravo. In: *II Simpósio Iberoamericano sobre Gestión y Economía Forestal*, Barcelona, pp. 18-20.
- SOARES, P., ALMEIDA, D., FONSECA, T., LOUZADA, J.L., SANDIM, A., CALADO, N., 2021. *Trabalho realizado para definição de modelos de gestão da regeneração natural em áreas de pinheiro-bravo jovem*. Relatório do Projeto rePlant - Implantação de estratégias colaborativas para a gestão integrada da floresta

e do fogo. <https://replant.pt/wp-content/uploads/2023/06/Relatorio-trabalho-previo-instalacao-ensaios.pdf>

WEST, G.B., BROWN, J.H., ENQUIST, B.J., 2001. A general model for ontogenetic growth. *Nature* **413**: 628 – 631.